

基于曲率优化的杆件弯扭变形精度提升方法*

李翔宇^{1,2}, 曾捷¹, 邵敏强¹, 常斌³

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国航空综合技术研究所 北京, 100028)

(3. 上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作航空科技重点实验室 上海, 201601)

摘要 航空航天器结构在长期服役过程中, 受到各种因素影响, 存在各种飞行安全问题。针对连杆结构服役过程中存在的扭转弯曲工况, 提出一种曲率信息计算优化方法, 借助光纤 Bragg 传感器反演结构扭转弯曲变形。此方法能够减小杆件弯扭变形过程中因光栅栅区尺寸因素导致的数据测量误差, 进而提升变形反演精度提升。ANSYS Workbench 有限元仿真结果表明, 这种方法与传统曲率递推反演方法相比, 能够将扭转/弯曲变形条件下杆件变形监测与反演平均误差减小 8%。小角度扭转/弯曲试验结果显示, 进行曲率信息计算优化方法修正后反演所得变形量相对误差较修正前减小 3.3%。研究结果表明, 所提方法适用于杆件结构扭转弯曲变形监测场合, 能够为未来航空器结构服役状态感知与自适应调整提供帮助。

关键词 连杆结构; 光纤 Bragg 传感器; 弯扭变形; 曲率信息计算优化

中图分类号 TH741; TP311.1; TP212.9

引言

随着飞机飞行速度越来越快, 起落架、舱门、尾翼舵面结构所承受载荷越来越大, 使得舱门与舵面的作动器、支柱、锁连杆等结构件在受载荷后会产生显著变形^[1-2]。在载荷较大的情况下, 各种连接杆件产生的较大变形会对飞机结构功能产生影响^[3-4]。实现针对连杆结构形态的监测, 能够为飞机结构健康状态评估提供重要参考。张新华等^[5]将作动器整个输出机构的变形看作是输出轴体扭转变形与摇臂变截面悬臂梁变形的综合, 通过理论推导了作动器机械刚度、载荷与弹性变形。Pham 等^[6]采用解析法研究了热环境下功能梯度材料(functionally graded materials, 简称 FGM) 环型壳体在扭转载荷下的屈曲, 分析了几何形态等因素对壳体稳定性的影响。柴锡军^[7]通过综合考虑花键轴在弯矩和转矩作用下的组合变形情况, 利用理论分析方法分析扭转变形对截面应力、螺旋角等参数的影响。李政^[8]利用 ANSYS 有限元分析方法开展了钢箱梁在弯扭联合作用下承载力与构件受力后的大变形效应的相关性研究。Gordeev 等^[9]利用高频扫频发生器测量了弹性梁扭矩, 反推得到结构扭转变形值。Francesca

等^[10]对闭孔聚氯乙烯(polyvinyl chloride, 简称 PVC) 结构进行扭转失效试验, 并利用三维数字图像法监测材料表面整个扭转变形过程与多轴行为。但数字摄像测试方法质量和体积大, 实时性较差, 存在视觉盲区等局限^[11]。与电阻应变片相比, 光纤 Bragg 光栅传感器(fiber bragg grating, 简称 FBG) 具有耐腐蚀、抗电磁干扰、集信号传输与传感于一体、便于分布式传感组网等特点, 适用于狭小复杂的测量空间^[12-13]。FBG 本身具有一定长度, 传感器所测线应变数值为敏感区域平均应变数值, 无法等效为理想化的测点位置应变数据, 直接以接触式测量方式将所得应变数值代入变形反演算法会导致一定的误差, 所以面对杆件旋转/扭转弯曲工况, 需要通过一定方法减小 FBG 的测量误差。

笔者依托曲率递推变形重构算法, 考虑连杆结构服役过程中的扭转弯曲变形情况, 将栅区长度、光纤光栅半径、旋转角度、扭转角度及变形后光栅敏感栅区两端角度差等因素进行综合分析计算, 得出了一种用于连杆结构扭转弯曲变形状态反演的曲率信息优化计算变形反演方法。通过实测变形值与算法所得变形值的对比, 验证了该方法的适用性。

* 航空科学基金资助项目(20170252004); 上海航天科技创新基金资助项目(SAST2018-015); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2018047); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-04-14

1 光纤光栅应变传感器原理

FBG作为一种典型波长调制型传感器,其敏感栅区仅对某个特征波长光波进行反射,而其他波长信号继续前向传输^[14]。待测结构应变会对光纤纤芯、纤芯折射率等产生影响,利用此特性可实现对应变的感知^[15]。光纤光栅反射光谱中心波长表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中: n_{eff} 为光栅栅区有效折射率; Λ 为光栅周期; λ_B 为反射光谱中心波长。

光纤 Bragg 光栅传感原理示意图如图 1 所示。

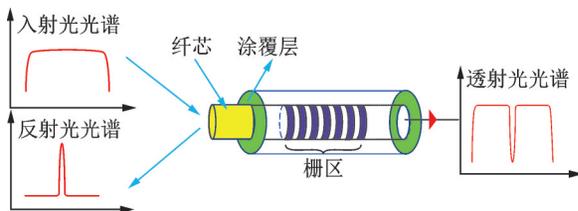


图1 光纤 Bragg 光栅传感器
Fig.1 Fiber Bragg grating sensor

在恒温条件下,若忽略扭转工况,仅考虑光纤随结构轴向变形所引起的弹光效应,则光纤光栅反射光谱中心波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与轴向应变 ϵ 的关系可以简化为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

其中: P_e 一般选取常数0.22。

借助光纤光栅解调仪测量反射光谱中心波长偏移量,将该波长偏移量代入式(2),可以计算结构所受应变信息。

2 曲率连续化处理

由于FBG实际测量物理量为结构的应变值,而形态反演算法理论基础是离散曲率的连续化,因此实现应变与曲率信息之间相互转换是反演算法的必要环节。

FBG沿结构表面轴向方向粘贴,取粘贴位置的结构微元段进行分析,如图2所示。假设微元段无外力作用时长度为 L ,厚度为 H 。结构微元表面存在力的作用时,微元表面产生拉伸或者压缩现象,相应产生正向或者负向应变。微元段结构上存在一个不受拉伸与压缩影响的过渡层,过渡层上的应力基本为零,这个过渡层叫做材料中性层。结构产生应变时,中性层的长度几乎不发生变化。

根据材料力学,中性层长度始终保持不变,可得

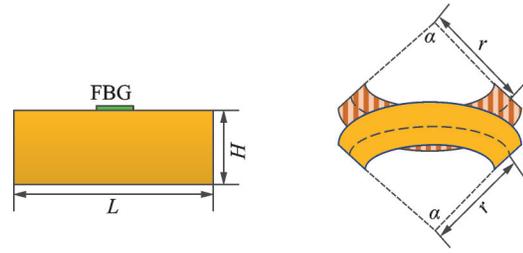


图2 应变与曲率的转换

Fig.2 Transformation of strain and curvature

出如下方程

$$L/r = (L + \Delta L)/(r + H/2) = \alpha \quad (3)$$

根据微应变的定义,有 $\Delta L/L = \epsilon$,则式(3)可以变成

$$r = H/(2\Delta L/L) = H/2\epsilon \quad (4)$$

其中: r 为曲率半径; ΔL 为结构微元段表面的长度变化量。

根据曲率 k 的定义,有

$$k = 2\epsilon/H \quad (5)$$

根据式(2),有

$$k = 2\Delta\lambda_B/(\lambda_B H(1 - P_e)) \quad (6)$$

式(5)将传感器所测位置点的应变值转换为曲率,式(6)完成了FBG中心波长偏移量到测量点曲率的转换。可以看出,FBG有效光弹系数 P_e 、结构厚度 H 等参数均为常量,使得曲率值的变化与光纤光栅传感器中心波长变化量呈线性相关关系。

3 传感器布局

针对连杆结构的三维空间变形监测与重构,传感器布置包括2种方式:2列(或4列)呈 90° 布局;3列呈 120° 布局,如图3所示。



图3 杆状结构传感器布局方式
Fig.3 Sensor layout of rod-shaped structure

在变形实时监测与形变状态反演过程中,需要知道测点坐标的空间变化,即各个测点位置的 (x, y, z) 坐标变化情况,至少需要知道两个方向的曲率变化情况。笔者采用2列光纤布置方案,即2列光纤 Bragg 光栅传感器相互呈 90° 夹角布置在连杆表面。通过应变测量,获取 x 与 y 方向的曲率信息变化,实现连杆形态反演。

4 基于连杆曲率信息的形态重构方法

假定连杆变形为空间弯曲变形,不存在扭转变形情况,则只需沿轴向方向取 1 条曲线就可以表征结构变形情况。

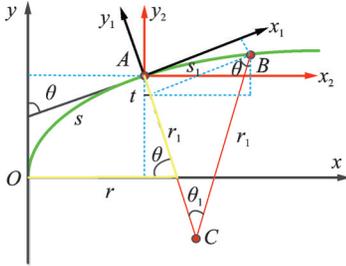


图 4 曲率递推过程

Fig.4 Curvature recursion process

记 AB 弧段的圆心角为 θ_1 , 长度为 S_1 。根据微分理论可得

$$\theta_1 = S_1 / r_1 \tag{7}$$

记 A 点曲率为 k_1 , B 点曲率为 k_2 , 曲率半径 R 采用 A 与 B 点的平均曲率半径表示

$$r_1 = \frac{r_A + r_B}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) = \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \tag{8}$$

代入式(7)得到

$$\theta_1 = S_1 2k_1k_2 / (k_1 + k_2) \tag{9}$$

在坐标系 x_1-A-y_1 中, B 点坐标为

$$\begin{cases} x_B = r_1 \sin \theta_1 = \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \sin \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \\ y_B = r_1 - r_1 \cos \theta_1 = \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \left[1 - \cos \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \right] \end{cases} \tag{10}$$

在 $x-O-y$ 直角坐标系中, 弧段上递推点 B 相对于 A 的坐标增量为

$$\begin{cases} \Delta x = r_1 \sin \theta_1 \sin \theta + y_B \cos \theta = \\ \sin \theta \sin \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} + \\ \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \left[1 - \cos \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \right] \cos \theta \\ \Delta y = r_1 \sin \theta_1 \cos \theta - y_B \sin \theta = \\ \cos \theta \sin \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} - \\ \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \left[1 - \cos \left(\frac{S_1 2k_1k_2}{k_1 + k_2} \right) \right] \sin \theta \end{cases} \tag{11}$$

可以看出, 递推点 B 相对于 A 的坐标增量只与

曲率与切角有关, 而切角可以利用弧长微元进行积分获得, 所以重构整个曲线时, 需要设置好递推点起点。整个曲线微元化分为 N 个弧段, 依次按照上述方法计算出从原点到第 1 个递推点、第 1 个递推点到第 2 个递推点、...、第 $N-1$ 个递推点到第 N 个递推点的坐标增量, 则最后第 N 个点的坐标为

$$\begin{cases} Nx = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n \\ Ny = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_n \end{cases} \tag{12}$$

用此方法可以求出曲线上任何一点的坐标值, 将所有离散点依次相连, 就可得到重构的曲线。针对笔者所研究的连杆结构, 选择 FBG 布置方式如图 3(a) 所示, 沿着 90° 方向正交布置 2 列光纤传感器。根据曲率递推算法, 可以分别重构连杆的 x 和 y 两个方向的纯弯曲变形特征。

5 扭转状态曲率信息优化方法

由于 FBG 栅区本身具有一定长度, 结构件旋扭后发生弹性形变, 使得传感器所测线应变数值不能等效为理想化的单点数据, 导致应变测量误差直接影响了曲率信息, 对曲线三维重构效果产生较大影响。针对这个问题, 在连杆结构弹性形变假设中, 考虑到传感区域具有一定长度的 Bragg 光栅传感器自身会随连杆结构发生旋转与扭转, 因此需要研究基于光纤应变数据感知的曲率信息计算优化算法, 以提高曲率信息辨识精度。

假设连杆结构直径为 D , 发生角度为 β 的旋转及角度为 φ 的扭转, 光纤半径为 r , 如图 5 所示。设图 5 中 AA_1 为 FBG 布置的方向, 即原坐标系的轴向, 其长度在发生变化之前记作 L_0 , AA_1 在中性面投影 $A'A_1'$ 长度记为 L_3 。传感器阵列中作为分析对象的光栅 PP_1 发生小角度扭转时也近似看作线段, 长度记为 L , 其在中性面投影 $P'P_1'$ 的长度记

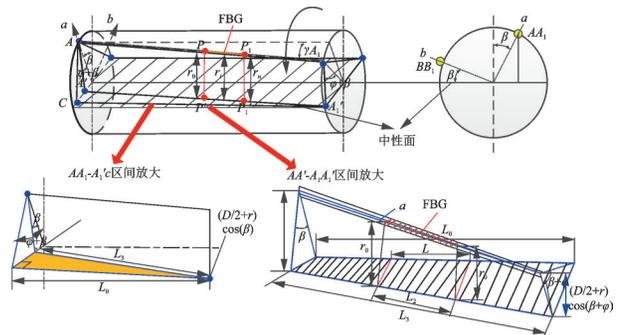


图 5 旋转扭转后传感器及结构状态分析

Fig.5 State analysis of sensor and structure after rotation and torsion

作 L_2 。

将光栅分成 n 个微元端, 根据图中的几何关系可得

$$L_3 = \sqrt{L_0^2 + (D/2 + r)^2 [\sin(\beta + \varphi) - \sin\beta]^2} \quad (13)$$

$$L/L_0 = L_2/L_3 \quad (14)$$

记光栅左端到中性面距离为 PP' , 长度设为 r_0 , 有

$$r_0 = \left(\frac{D}{2} + r\right) \cos(\beta + \varphi) + \left(\frac{L_2 + L_3}{2}\right) \tan\alpha \quad (15)$$

其中: α 表示因为连杆扭转所导致光栅栅区两端产生的角度差, 此因子影响了栅区每一个点到中性面的距离。

根据图中几何关系, 可得

$$\tan\alpha = \frac{(D/2 + r) [\cos\beta - \cos(\beta + \varphi)]}{L_3} \quad (16)$$

连杆结构发生扭转后, FBG 随结构发生位置变化, 导致栅区每一点到中性面距离发生变化。这里假设第 i 段微元到中性面的距离为 r_i

$$r_i = r_0 - (L_2/n) i \tan\alpha \quad (17)$$

当连杆发生扭转, 又受到弯曲载荷作用, 如图 6 所示。光栅随连杆发生弯曲, 利用微元法分析计算第 i 微元段的弧长, 选取了微圆弧段 $(r_{i-1} - r_i)$ 的中点 P_2 点, 该点到中性面的距离记为 $P_2 - P_2'$, 其长度为

$$L_{P_2P_2'} = (r_{i-1} + r_i)/2 \quad (18)$$

据此, 第 i 段微元弧段的弧长 S_i 为

$$S_i = [\rho + L_{P_2P_2'}] d\theta = \left[\rho + \frac{r_{i-1} + r_i}{2}\right] d\theta \quad (19)$$

记连杆扭转弯曲后光栅长度为 L_1 , 将式(14)与式(17)代入式(19), 可以得到

$$L_1 = n\rho d\theta + nr_0 d\theta - \frac{LL_3}{2L_0} n \tan\alpha d\theta \quad (20)$$

根据中性面定义, 弯曲时中性面不发生变形, 所

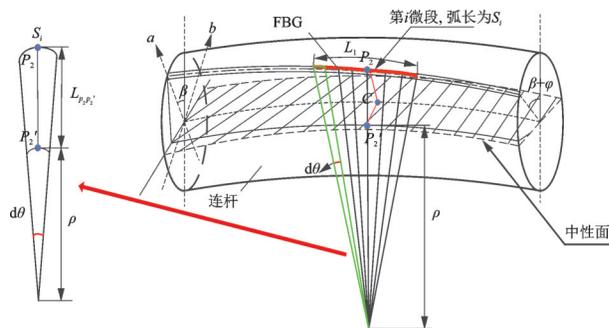


图 6 连杆弯扭变形后传感器与结构状态分析

Fig.6 Analysis of sensor and structure state after bending and torsion deformation of connecting rod

以此时投影长度 L_2 的大小为

$$L_2 = n\rho d\theta = LL_3/L_0 \rightarrow nd\theta = LL_3/\rho L_0 \quad (21)$$

将式(21)代入式(20), 得到

$$L_1 = \left(\rho + r_0 - \frac{LL_3}{2L_0} \tan\alpha\right) \frac{LL_3}{\rho L_0} \quad (22)$$

根据式(22), 结合应变定义可以得出光纤光栅传感器随结构体发生变化后, 光栅 A 感受的轴向应变 ϵ_a 大小

$$\epsilon_a = \frac{L_1 - L}{L} = \left(\left(\rho + r_0 - \frac{LL_3}{2L_0} \tan\alpha\right) \frac{LL_3}{\rho L_0} - L\right) / L = \frac{L_3}{L_0} + r_0 \frac{L_3}{\rho L_0} - \frac{L_3^2}{\rho L_0} \tan\alpha - 1 \quad (23)$$

同理, 可以得出光纤光栅传感器随结构体发生变化后, 光栅 B 感受的轴向应变 ϵ_b 大小。

记光纤光栅传感器随结构体扭转弯曲后, 光栅 B 在中性面的投影长度为 L_4

$$\epsilon_b = \frac{L_4}{L} + r_0 \frac{L_3}{\rho L_0} - \frac{L_3^2}{\rho L_0} \tan\alpha_1 - 1 \quad (24)$$

$$L_4 = \sqrt{L_0^2 + (D/2 + r)^2 [\cos\beta - \cos(\beta + \varphi)]^2} \quad (25)$$

式(24)中的 $\tan\alpha_1$ 表示因为结构体扭转弯曲导致的光栅 B 的敏感区两端产生的角度差的正切值, 有

$$\tan\alpha_1 = \frac{(D/2 + r) [\sin(\beta + \varphi) - \sin\beta]}{L_4} \quad (26)$$

在旋转和弯曲同时存在时, 所布置的 2 列光纤 Bragg 光栅传感器随结构体整体变化后的截面如图 7 所示。

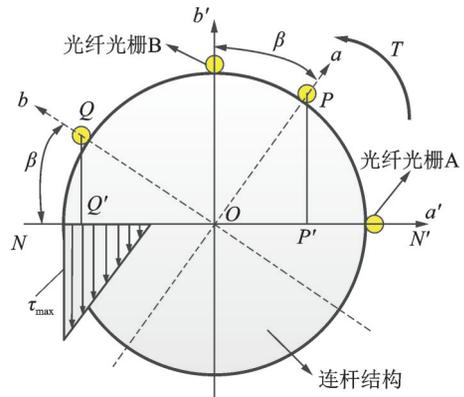


图 7 结构截面传感器分析

Fig.7 Sensor analysis of structural section

$N-N'$ 为弯曲中性面, 2 列光纤 Bragg 光栅传感器跟随结构体变化后分别位于 P 和 Q 点, 距离中性面的距离分别为 PP' 和 QQ' , 有

$$|PP'| = (D/2 + r) \cos \beta \quad (27)$$

$$|QQ'| = (D/2 + r) \sin \beta \quad (28)$$

其中: r 为光纤传感器半径。

光纤 Bragg 光栅传感器 A 和 B 的轴向应变 ϵ_a 与 ϵ_b 分别为

$$\epsilon_a = ((D/2 + r) \cos \beta) / \rho \quad (29)$$

$$\epsilon_b = ((D/2 + r) \sin \beta) / \rho \quad (30)$$

其中: ρ 为曲率半径。

将式(29)与式(30)代入式(2),可得

$$\frac{\Delta \lambda_a}{\lambda_a} = (1 - P_e) \epsilon_a = (1 - P_e) \frac{(D/2 + r) \cos \beta}{\rho} \quad (31)$$

$$\frac{\Delta \lambda_b}{\lambda_b} = (1 - P_e) \epsilon_b = (1 - P_e) \frac{(D/2 + r) \sin \beta}{\rho} \quad (32)$$

其中:中心波长偏移量 $\Delta \lambda_a$ 与 $\Delta \lambda_b$ 在弯曲过程中不断变化; λ_a 与 λ_b 为 Bragg 光栅初始中心波长。

据此,空间曲率半径大小为

$$\rho = \frac{(D/2 + r)(1 - P_e) \lambda_a}{\Delta \lambda_a} \cos \left(\arctan \left[\frac{\Delta \lambda_b \lambda_a}{\Delta \lambda_a \lambda_b} \right] \right) \quad (33)$$

根据式(33),可以得到旋转下的弯曲状态光栅所得的轴向修正曲率值 $k = 1/\rho$ 。

同理,将式(23)与式(24)代入式(2),可以得到旋转/扭转状态同时存在工况下的曲率值。将此时的曲率信息代入曲率递推算法计算,即可得到应变与曲率修正后的变形优化曲线。

6 变形反演效果验证

6.1 有限元仿真分析与验证

采用有限元数值仿真方法,分别得到未考虑扭情况下递推算法所反演出的扭转弯曲变形曲线和经过曲率信息优化后的递推算法所反演出的扭转弯曲变形曲线,与有限元仿真原曲线进行对比并进行误差分析。取 $r=0.125$ mm, $D=60$ mm, $L_0=455$ mm, $L=10$ mm, $P_e=0.22$, 设连杆的旋转角度 β 为 10° (0.174 rad), 扭转角度 φ 为 15° (0.262 rad)。

提取有限元仿真所得连杆表面传感器布置路径上测点位置应变、曲率及位移信息,代入优化前后两种递推算法进行曲线的反演。3条连杆空间变形对比曲线如图8所示。通过曲率信息计算优化后的反演变形曲线挠度与有限元仿真值更加接近,较于优化前绝对误差由 0.79 cm 缩小到 0.41 cm, 平均相对误差减小约 8%。

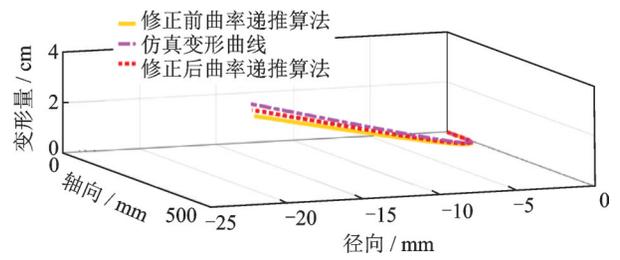
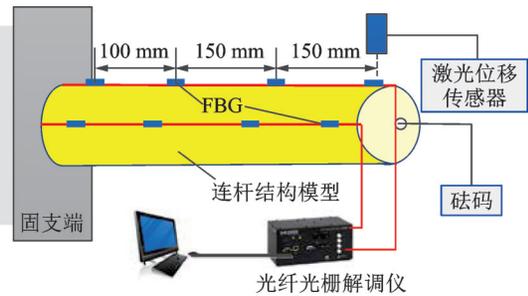


图8 曲率信息优化前后形态反演曲线对比

Fig.8 Morphological inversion curve comparison

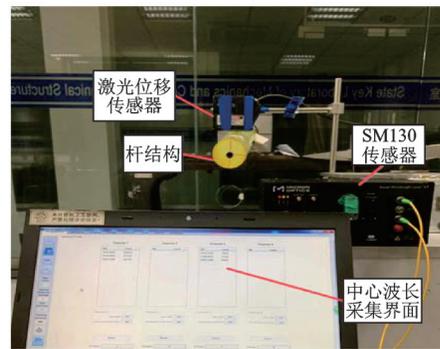
6.2 试验系统

将连杆结构单端固定,整个光纤变形测试系统如图9所示。试验系统由连杆结构(PU 聚氨酯材料)、固支夹具、固支台架、si255 光纤 Bragg 光栅传感器、SM130 光纤光栅解调设备、数据采集卡及加载砝码等组成,使用 LK-G85 基恩士激光位移传感器测量传感器所在位置的位移,作为变形量的真值与反演所得变形值进行对比。



(a) 连杆变形光纤测试系统示意图

(a) Diagram of the fiber-optic test system



(b) 试验系统的搭建

(b) Experimental system

图9 连杆变形光纤监测系统

Fig.9 Fiber optic monitoring system for deformation

6.3 试验结果与讨论

以单向加载为例,在重力方向悬挂 2 kg 的砝码,使得杆件产生变形。单方向加载后的变形监测效果如图10所示。

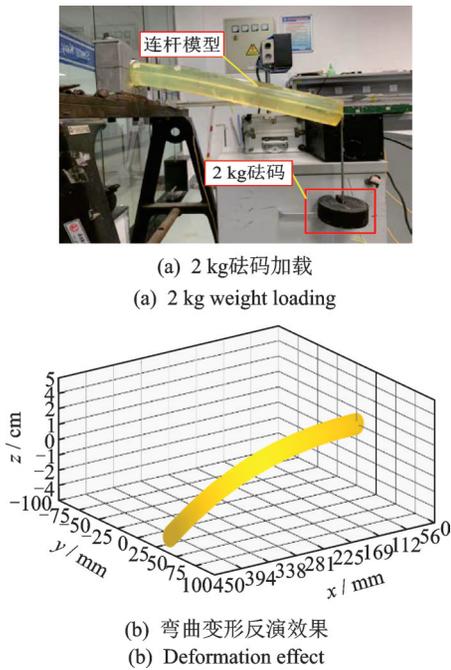


图 10 单方向加载弯曲变形可视化
Fig.10 Deformation visualization

在截面处标记 1 条 10° 的标识线, 将此 10° 的标识位置逆时针扭转到重力方向位置, 以便获取试验所需的扭转变形角度, 如图 11 所示。



图 11 扭转弯曲加载
Fig.11 Torsion bending loading

扭转变形的扭转角公式为

$$\theta = Tl/GI_p \quad (34)$$

其中: T 为扭力大小; l 为连杆结构长度; G 为结构剪切模量; I_p 为结构极惯性矩。

由此可以推算出, 所施加扭矩的大小 M 为

$$M = TR \quad (35)$$

曲率优化前后连杆形态反演效果对比见图 12。

由图 12 可以看出, 曲率优化计算方法反演曲线更贴近于理想曲线, 从可视化角度可以明显看到曲率优化计算方法对弯扭变形反演精度的提高。为定量研究曲率优化计算方法对弯扭变形的精度影响, 将光纤传感器采集到的应变数据代入优化算法, 获得变形量曲线, 将其与激光位移传感器实测数据及

无修正反演曲线进行对比, 如图 13 所示。

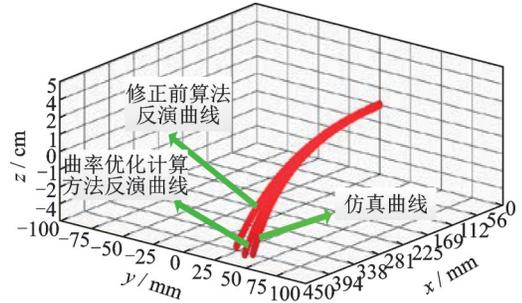


图 12 优化前后所得连杆扭转变形反演效果
Fig.12 Deformation inversion effect

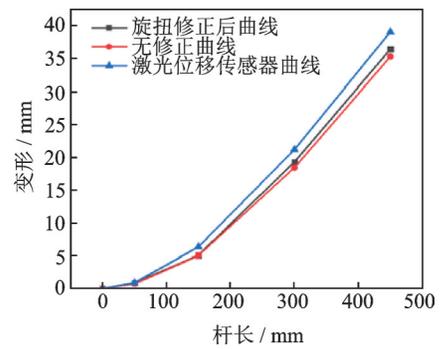


图 13 变形量对比
Fig.13 Comparison of deformation and error

在扭力与重力方向 2 kg 载荷同时作用下, 通过曲率信息优化算法修正后所得 4 个测点位置的变形量分别为 0.872 8, 6.060 4, 19.283 和 36.416 mm。两种变形重构算法所反演出的拟合曲线变形值与激光位移传感器实测变形数值变化呈现相同的趋势。此种复合加载工况下, 经过修正后反演算法所得变形量的最大绝对误差为 2.627 mm, 而未采用修正算法反演所得最大绝对误差为 3.743 mm, 相对误差减小 3.3%。这表明曲率信息优化计算方法一定程度上能够提高弯扭复合变形状态的形态反演精度。

7 结 论

1) 针对圆截面杆状结构, 提出 2 列光纤传感器布局方案, 通过将连杆结构 x 和 y 两个方向布置的光纤传感器测点位置的应变输出值换算成曲率信息, 以递推方式实现对整个连杆结构的形态重构。

2) 针对连杆结构服役状态存在的扭转及旋转工况, 提出了一种曲率优化计算方法, 该方法综合考虑了栅区长度、光纤光栅半径、旋转角度及扭转角度等因素。有限元仿真结果表明, 这种方法能够将扭转/弯曲变形条件下杆件变形监测与反演平均误

差减小8%。

3) 通过小扭转角度连杆弯曲变形试验,获得曲率信息优化前后两种变形反演方法所反演曲线的变形量。试验结果表明,该方法使得反演变形相对误差减小3.3%,效果优于未经修正的曲率递推算法。

参 考 文 献

- [1] 刘铸永. 刚-柔耦合系统动力学建模理论与仿真技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [2] 杨智春, 贾有. 动载荷识别方法的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 47(2): 384.
YANG Zhichun, JIA You. The research progress of dynamic load identification method [J]. Mechanical and Practice, 2015, 47(2): 384. (in Chinese)
- [3] 陈育良, 徐达生, 陈永卿. 某飞机起落架舱门拉杆故障分析与处理[J]. 装备制造技术, 2018(4): 225-227.
CHEN Yuliang, XU Dasheng, CHEN Yongqing. Failure analysis and treatment of landing gear door tie rod of an aircraft [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(4): 225-227. (in Chinese)
- [4] 冯飞, 常正, 聂宏, 等. 飞机柔性对前起落架摆振的影响分析[J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2227-2235.
FENG Fei, CHANG Zheng, NIE Hong, et al. Influence analysis of aircraft flexibility on nose landing gear shimmy [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2011, 32(12): 2227-2235. (in Chinese)
- [5] 张新华, 刘源, 张兆凯, 等. 作动器输出机构刚度优化设计与仿真分析[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(2): 55-59.
ZHANG Xinhua, LIU Yuan, ZHANG Zhaokai, et al. Optimal design and simulation analysis of actuator output mechanism stiffness [J]. Journal of Navigation, 2018, 5(2): 55-59. (in Chinese)
- [6] PHAM M V, NGUYEN D D. Nonlinear response and buckling analysis of eccentrically stiffened FGM toroidal shell segments in thermal environment [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 79: 383-398.
- [7] 柴锡军. 花键轴扭转变形及破坏分析[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(2): 33-35.
CHAI Xijun. Torsional deformation and failure analysis of spline shaft [J]. Mechanical Research and Application, 2018, 31(2): 33-35. (in Chinese)
- [8] 李政. 钢箱梁在弯扭联合作用下承载力的相关性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [9] GORDEEV B A, OKHULKOV S N, PLEKHOV A S, et al. Measuring the torque of rotating shafts [J]. Russian Engineering Research, 2015, 35: 315-319.
- [10] CONCAS F, DIEBELS S, JUNG A. Multiaxial failure surface of PVC foams and monitoring of deformation bands by three-dimensional digital image correlation [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 130(S): 195-215.
- [11] GM A, VB A, PAB E, et al. Microindentation sensor system based on an optical fiber Bragg grating for the mechanical characterization of articular cartilage by stress-relaxation-science direct [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 252: 440-449.
- [12] ZHANG Z Y. Design of vibration sensor based on fiber Bragg grating [J]. Photonic Sensors, 2017, 7(4): 345-349.
- [13] 曲道明, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2018(1): 144-151.
QU Daoming, SUN Guangkai, LI Hong, et al. Fiber optic sensing and reconstruction method of flexible skin shape of deformed airfoil [J]. Chinese Journal of Instrumentation, 2018(1): 144-151. (in Chinese)
- [14] GURPREET K, KALER R S. Wavelength remodulation and dispersion compensation for full-duplex radio over fiber system using fiber Bragg grating [J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2019, 206: 163223.
- [15] 张文定, 李鑫, 白家浩, 等. 光纤结构光场产生及应用[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 51-69.
ZHANG Wending, LI Xin, BAI Jiahao, et al. Structure light field of optical fiber producing and application [J]. Journal of Optics, 2019, 39(1): 51-69. (in Chinese)



第一作者简介:李翔宇,男,1994年4月生,硕士生。主要研究方向为光纤智能监测技术在结构健康监测领域的应用。
E-mail: 190693398@qq.com

通信作者简介:曾捷,男,1976年7月生,博士、副教授。主要研究方向为分布式光纤传感技术及其在结构健康监测领域的应用等。

E-mail: zj2007@nuaa.edu.cn